УДК 331.45 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20

Конечно-элементный анализ параметров микроклимата в кабине металлургического крана

В. В. Масленский, Ю. И. Булыгин
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. В статье произведен анализ параметров микроклимата (температуры, скорости движения и давления воздуха), поддерживаемых в кабине металлургического крана системой кондиционирования, при помощи метода конечных элементов, интегрированного в программный комплекс ANSYS. Система кондиционирования кабины металлургического крана была подобрана на основании инженерного расчета требуемого расхода приточного воздуха, учитывающего влияющие на производительность системы расположения оборудования и степени его запыленности.
Постановка задачи. Задачей данного исследования являлась проверка эффективности работы системы кондиционирования кабины металлургического крана, выбранной по результатам инженерного расчета.
Теоретическая часть. В основной части исследования были построены поля распределения температуры, скорости движения и давления воздуха внутри кабины металлургического крана, значения в отдельных точках которых были сравнены с гигиеническими нормативами. Кроме того, были рассмотрены факторы, влияющие на адекватность разрабатываемой модели, а именно: структура сетки, способ настройки начальных и граничных условий.
Выводы. Уточнение расчетной сетки и учет инфильтрации в модели позволили получить более корректные результаты и установить, что температура в характерных точках отличается не более чем на 1,3°С; значения скоростей не превышают нормативные 0,3 м/с; средняя нормируемая температура 24°С поддерживается в объеме, составляющем около 60–70 % всего объема кабины.

Ключевые слова: кабина металлургического крана, кондиционирование, параметры микроклимата, конечно-элементный анализ.

***Для цитирования*:** Масленский, В. В. Конечно-элементный анализ параметров микроклимата в кабине металлургического крана / В. В. Масленский, Ю. И. Булыгин // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 1. — С. 10−20. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20

Finite element analysis of microclimate parameters in the metallurgical crane cabin

V. V. Maslenskiy, Yu. I. Bulygin
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The article analyzes the microclimate parameters (temperature, speed and air pressure) in the metallurgical crane cabin provided by the air conditioning system using the finite element method integrated into the ANSYS software package. The metallurgical crane cabin air conditioning system was selected based on the engineering calculation of the required air flow rate supply, taking into account factors that affect the system performance, such as the location of the equipment and the degree of its dustiness.
Problem Statement. The purpose of this research was to check the efficiency of the air conditioning system of the metallurgical crane cabin, which was selected based on the results of the engineering calculations.
Theoretical Part. In the main part of the research, the distribution fields of temperature, speed and air pressure inside the cabin of a metallurgical crane were constructed, the values at the points of which were compared with the hygienic standards. In addition, the factors that affect the adequacy of the developed model were considered, namely the grid structure, the way to set the initial and boundary conditions.
Conclusion. The refinement of the analysis grid and the consideration of infiltration in the model eventually allowed us to get more correct results: the temperature at the characteristic points differ by no more than 1.3 °C, the speed values do not exceed the standard 0.3 m/s, the average normalized temperature of 24 °C is maintained in a volume of about 60-70 % of the total cabin volume.

Keywords: metallurgical crane cabin, air conditioning, microclimate parameters, finite element analysis.

***For citation*:** Maslenskiy V. V., Bulygin Yu. I. Finite element analysis of microclimate parameters in the metallurgical crane cabin: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021;1:10−20. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20

Введение. Условия труда операторов технологических и мобильных машин часто характеризуются высокими значениями показателей микроклимата, а именно — температуры и интенсивности теплового облучения. Воздействуя на работника, они могут приводить к снижению физической работоспособности, возникновению простудных и, уже спустя год работы, профессиональных заболеваний сердечно-сосудистой и дыхательной систем [1, 2].

Для предотвращения случаев профессиональных заболеваний среди работников вредных по параметрам микроклимата производств необходимы такие средства тепловой защиты рабочих мест, к эффективности которых предъявляются повышенные требованиями, к примеру, системы кондиционирования воздуха.

Постановка задачи. При расчете и выборе системы кондиционирования технологических и мобильных машин часто остается неучтенным множество эксплуатационных факторов: запыленность воздуха и оборудования, длина трассы и расположение элементов системы кондиционирования. Кроме того, немаловажным является и оценка экстремальных граничных метеоусловий окружающей среды, в которых могут эксплуатироваться машины. Все это позволяет спрогнозировать возможное снижение производительности выбираемой системы при эксплуатации и исключить негативное воздействие на работника [3–5].

В данном исследовании поставлена задача проверить эффективность системы кондиционирования кабины металлургического крана, для которой были определены ее основные характеристики — расход приточного воздуха и холодопроизводительность. Данные характеристики включают в себя поправочный коэффициент, учитывающий потери давления в линиях трассировки, способ расположения внутреннего и внешнего блока системы, а также их загрязненность. Проверка эффективности производится путем построения полей температуры, скорости движения и давления воздуха внутри кабины металлургического крана в программном комплексе ANSYS.

Объектом исследования выступила кабина металлургического крана, эксплуатируемого на участке дуговой сталеплавильной печи (ДСП) электросталеплавильного цеха.

Теоретическая часть. Построение расчетной области. На основе конструкторской трехмерной модели кабины в САПР была разработана расчетная область (рис. 1). В ходе выполнения работ геометрия кабины слегка упрощалась, исключались элементы, незначительно влияющие на общий характер процессов газодинамики и получение термодинамических параметров модели. Из геометрии исключались сложные (мелкие и саблевидные) элементы поверхности, кромки, зазоры между поверхностями [6, 7].

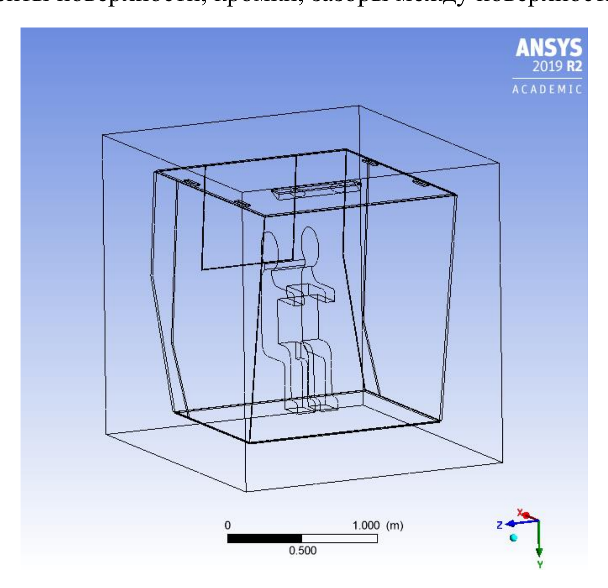
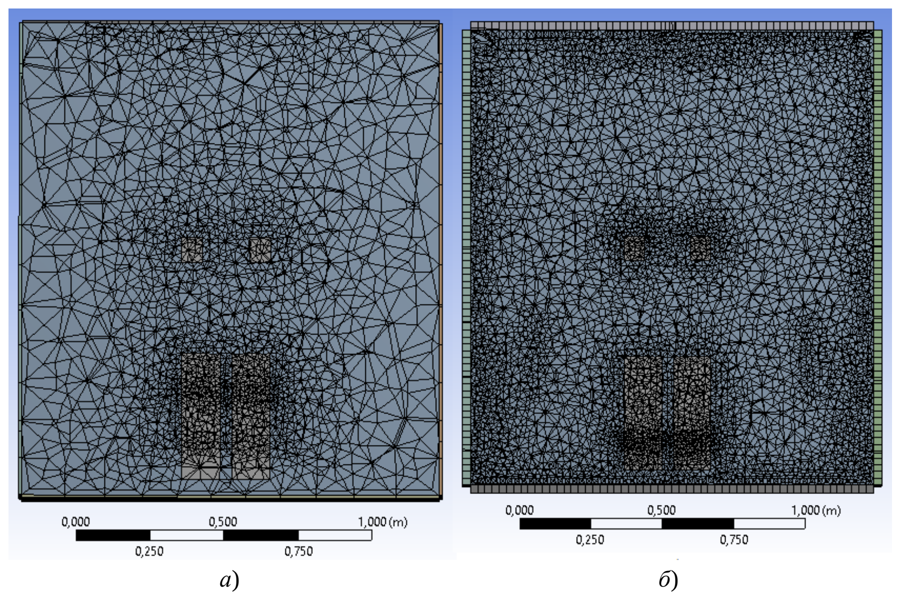


Рис. 1. Расчетная область кабины металлургического крана (вид спереди)

Учет теплопередачи через многослойные ограждения кабины, влияющей на суммарные теплопритоки, рассчитанные при помощи инженерных методик (из теплового баланса кабины) и составляющие не более 30 % от всех теплопритоков, производился путем задания термического контактного сопротивления (thermal contact resistance) в ANSYS. Данный коэффициент интегрирует в себе значения разности температур, толщин и коэффициентов теплопередачи между разнородными слоями ограждений, а также теплопритоки.

Расчетная сетка. Сравнительный расчет процессов проводился с разной структурой сетки: грубой — у пристеночной зоны (размеры элементов — 0,15 м) (рис. 2 а) и более плотной (размеры элементов — 0,025 м) (рис. 2 б).



а) *б)*

Рис. 2. Расчетная сетка: а — грубая; б — мелкая

Задаваемые начальные и граничные условия. В качестве других граничных условий использовались температуры на поверхности стенок и расходы подаваемого в кабину воздуха, определенные на основе инженерных методик.

Ниже представлена таблица 1 с граничными условиями модели. Для некоторых стенок дополнительно задавались теплопритоки от источников теплового излучения на участке ДСП.

Таблица 1

Граничные условия модели

№ п/п	Тип стенки	Граничные условия			
		Температура окружающего воздуха, °С	Теплоприток от стенки, Вт/м^2	Теплоприток от источников теплового излучения, Вт/м^2	Термическое контактное сопротивление, м^2·К/Вт
1	Передняя стенка	38,35	210	1445	0,11
2	Боковые стенки		104	951	0,09
3	Верхняя стенка		177	–	0,2
4	Задняя стенка		59	–	0,19
5	Пол		54	1705	0,32

Результаты моделирования тепломассопереноса в кабине металлургического крана (грубая сетка 0,15 м). Математическая модель тепломассопереноса и расчет термодинамических параметров и подвижности воздушных потоков в кабине металлургического крана, выполненная в программном комплексе ANSYS, с одной стороны позволяет прояснить детальную картину распределения термодинамических параметров в кабине (поля температур и движения воздуха), а с другой — рассмотреть проблему определения полей давлений, к значениям которых есть определенные эксплуатационные требования. По требованиям производительности системы вентиляции должно хватать для обеспечения избыточного давления в кабине комбайна в диапазоне 50–200 Па с учетом воздухообмена с внешней средой.

Расчет воздушных потоков и термодинамики в унифицированной кабине зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов был смоделирован при помощи подключаемого модуля FluidFlow (CFX). Для данного случая была выбрана более точная модель турбулентности — Shear Stress Transport (SST), обеспечивающая адекватное поведение модельных уравнений как в пристенной, так и в дальней зоне поля. Это

связано с тем, что модель SST для расчета пограничного слоя использует k-ω модель, а для расчета ядра потока на удалении от стенок — k-ε модель. В этом, собственно, и заключается преимущество данной модели турбулентности. К недостатку можно лишь отнести завышение уровня турбулентности в областях с высокими ускорениями либо в застойных зонах, что нехарактерно для данного случая [8, 9].

Модель SST описывается уравнениями, аналогичными уравнениям стандартной k-ω модели. Решение уравнений позволило получить картины распределений полей температур, скоростей и давлений на рабочем месте оператора.

На рис. 3 представлены рассчитанные поля распределения температур в кабине относительно дефлекторов и оператора (в различных плоскостях), на рис. 4 — поля распределения скоростей воздуха в кабине, на рис. 5 — поля распределения давления в кабине.

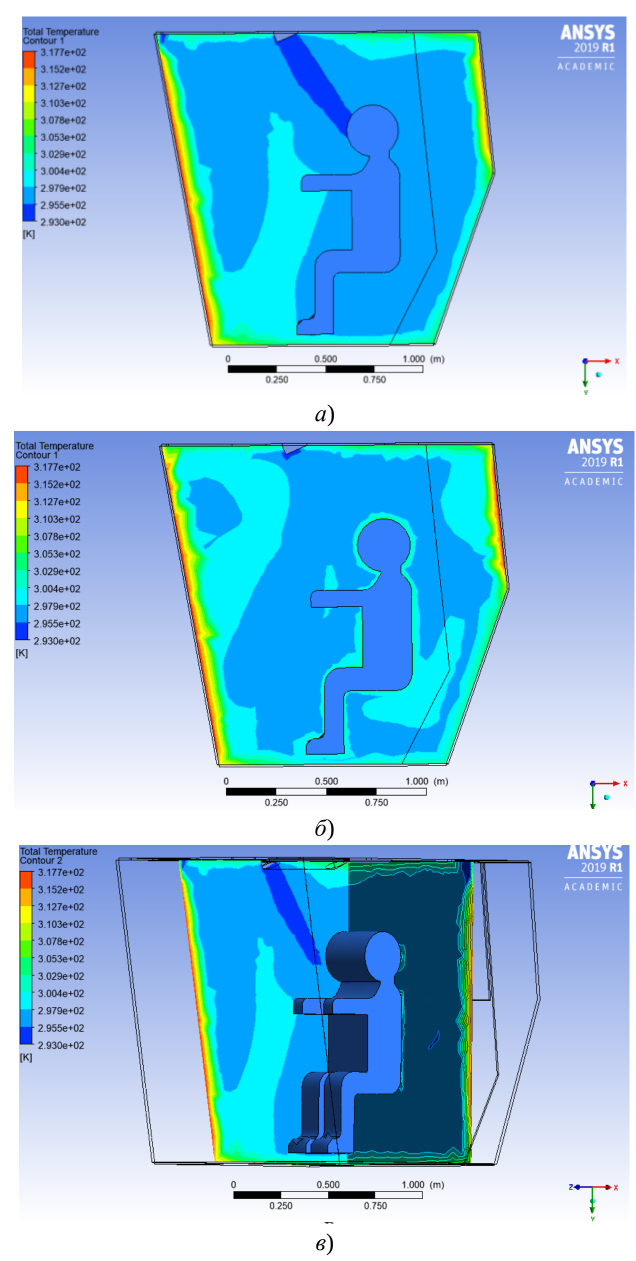
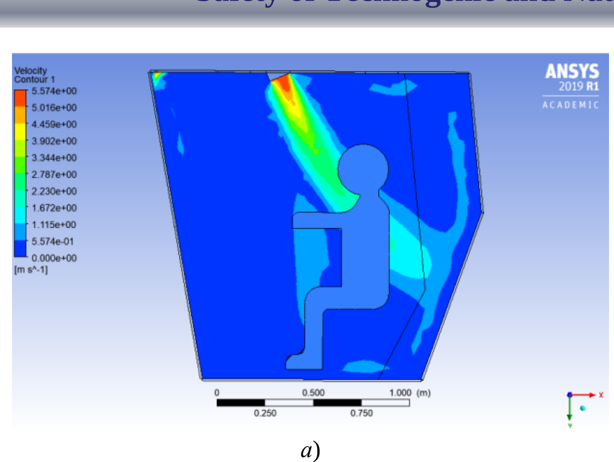
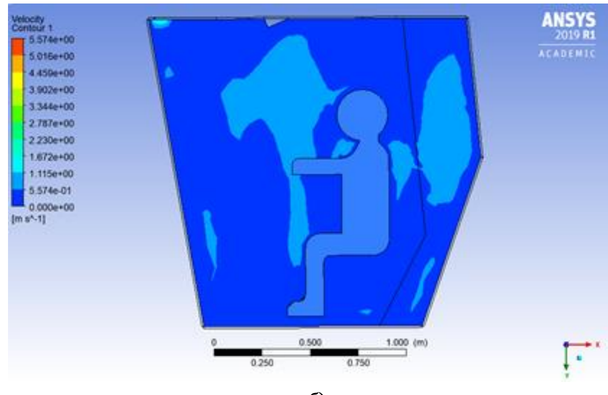


Рис. 3. Распределение температур в кабине металлургического крана: а — относительно дефлекторов (в двухмерной плоскости); б — относительно оператора (в двухмерной плоскости); в — относительно дефлекторов (в трехмерной плоскости)

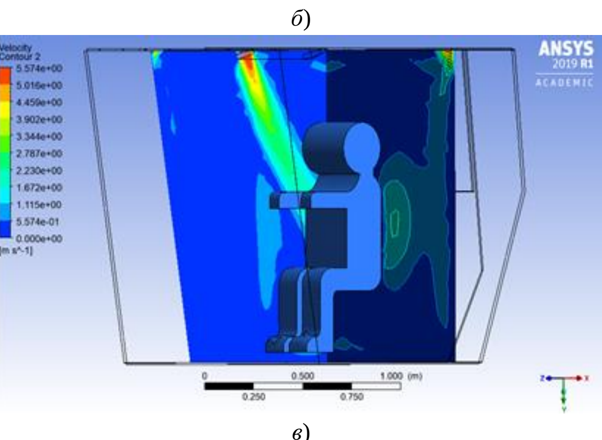
Исходя из полученных результатов построения полей температур в кабине (рис. 3), можно сделать следующий вывод: определенного инженерными методами расхода подаваемого в кабину воздуха (680 м^3/ч) с заданной температурой (293 К или 20°С) будет достаточно для обеспечения температуры в кабине, соответствующей допустимому классу условий труда 2 (297 К или 24 °С). Следовательно, работник не будет подвергаться неблагоприятному воздействию.



а)



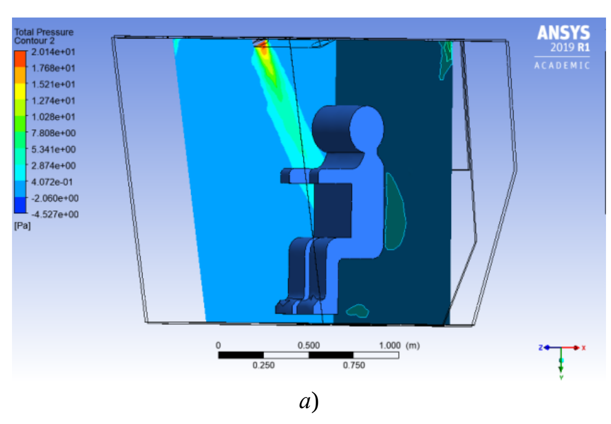
б)



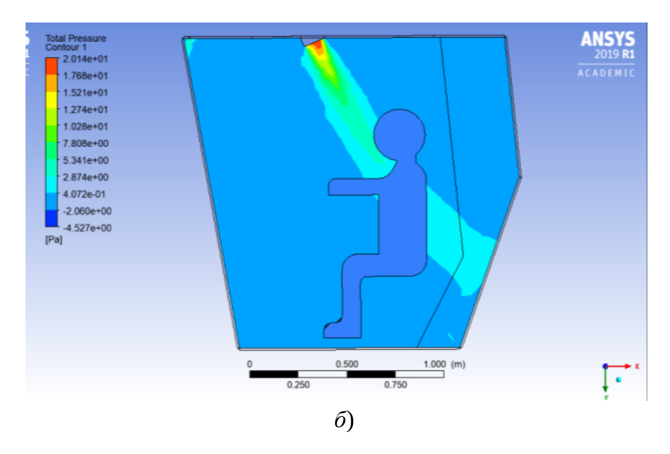
в)

Рис. 4. Распределение скоростей воздуха в кабине: а — относительно дефлекторов (в двухмерной плоскости); б — относительно оператора (в двухмерной плоскости); в — относительно дефлекторов (в трехмерной плоскости)

Исходя из полученных результатов построения полей скоростей в кабине (рис. 4), можно сделать следующий вывод: при определенном инженерными методами расходе подаваемого в кабину воздуха, скорость движения воздуха в непосредственной близости от оператора будет составлять 0,56–1,12 м/с, что несколько превышает санитарно-гигиенический норматив, установленный для допустимых условий труда (0,1–0,2 м/с). Следовательно, у работника возможно возникновение простудных заболеваний.



а)



б)

Рис. 5. Распределение давления в кабине: а — относительно дефлекторов (в трехмерной плоскости);
б — относительно дефлекторов (в двухмерной плоскости)

Исходя из полученных результатов построения полей давления в кабине (рис. 5), можно сделать следующий вывод: давление в потоке подаваемого в кабину воздуха при определенном инженерными методами расходе в среднем составляет 2,87 Па, что предположительно будет достаточно для достижения в кабине давления, большего, чем 50 Па спустя отведенные на эксперимент 15 минут. К сожалению, при данном подходе средства ANSYS FluidFlow (CFX) не предполагают построение картины равномерного распределения давления в замкнутом пространстве при подаче воздуха внутрь. Возможно только отображение давления в потоке подаваемого воздуха.

Верификация модели (грубая сетка 0,15 м). Температура окружающего воздуха измеряется в точках 1–7 (рис. 6) или в наиболее близких к ним точках. Скорость воздуха рекомендуется измерять в точке на уровне глаз оператора (точка 7 на рис. 6) [10].

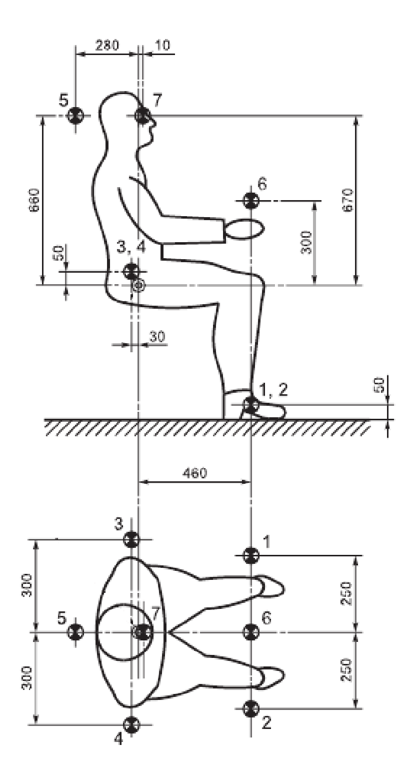


Рис. 6. Расположение точек измерения

Общие минимальные рабочие характеристики:

— результаты измерения температуры окружающего пространства оператора не должны отличаться более, чем на 5°С при всех режимах кондиционирования, отопления или вентиляции;

— рекомендуется, чтобы максимальная скорость движения воздуха перед глазами оператора (позиция 7 рис. 6) не превышала 0,3 м/с.

Результаты расчетов значений температуры и скорости движения воздуха представлены на рис. 7 и 8.

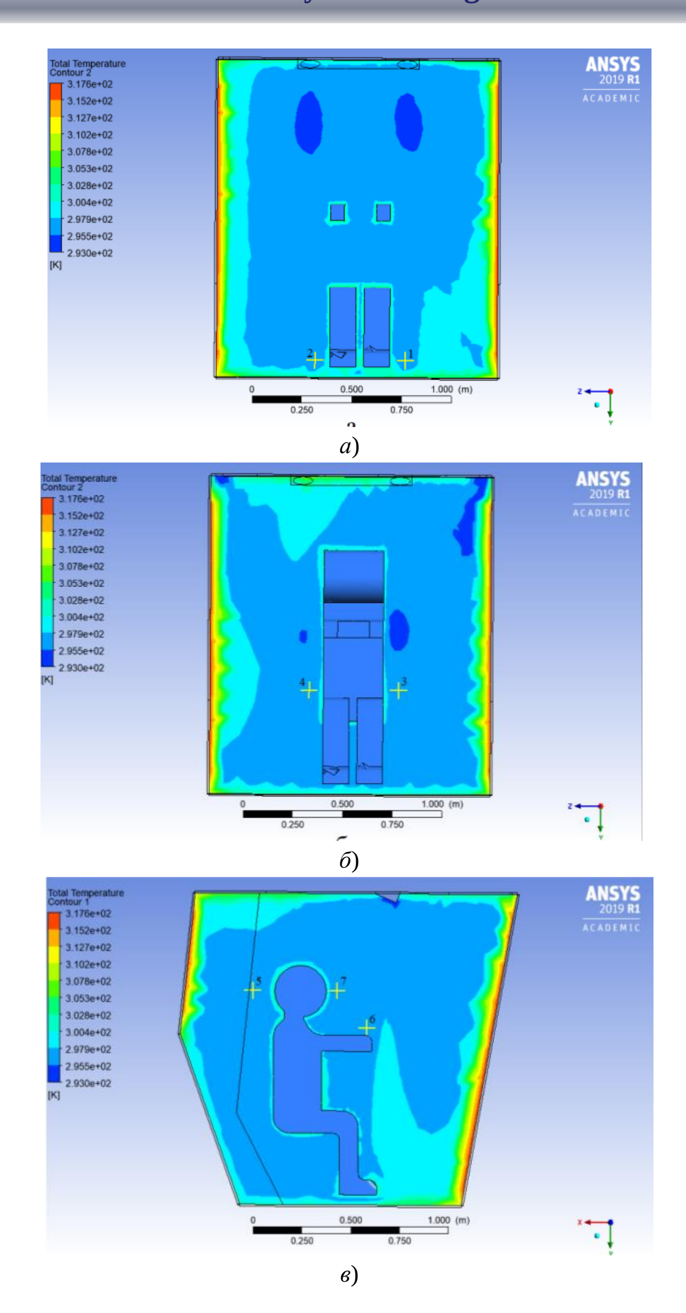


Рис. 7. Результаты расчетов температуры:
а — в точках 1, 2; б — в точках 3, 4; в — в точках 5, 6 и 7

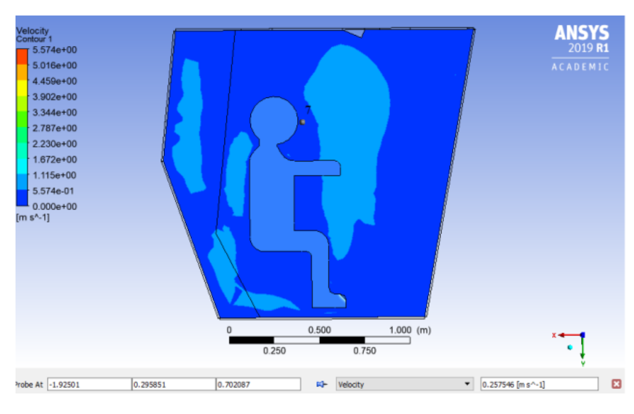


Рис. 8. Результаты расчетов скорости воздуха в точке 7

Как видно из результатов измерений, температура во всех точках одинакова (297 К или 24°С), а скорость в точке 7 не превышает 0,3 м/с. Следовательно, можно говорить о правильности рассчитанных

параметров кондиционера и модели в целом с точки зрения достижения необходимой температуры и скорости движения воздуха.

Верификация модели (мелкая сетка 0,025 м). В модель с мелкой сеткой были внесены следующие изменения:

1) Расчет выполнен в программе ANSYS 2019 R3.

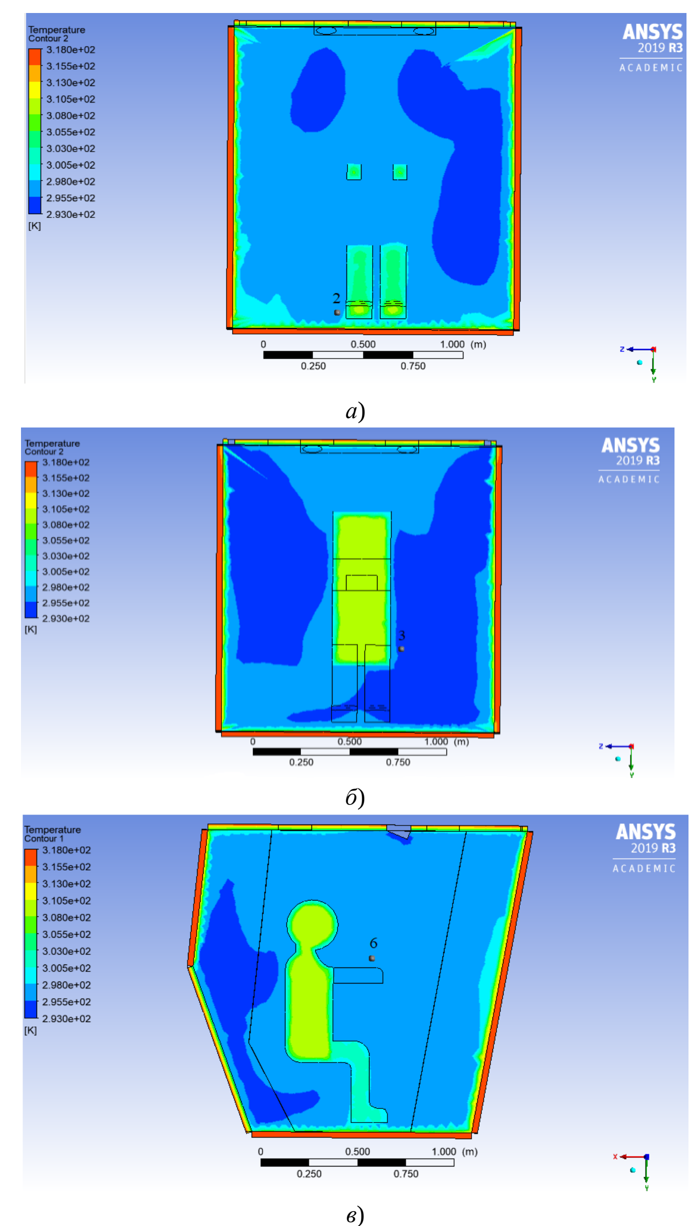
2) Изменен размер ячеек сетки с 0,13 м до 0,025 м, в результате чего суммарное время расчета составило 1 час. Кроме того, увеличена плотность ячеек в пристеночной области для уточнения результатов процесса теплопередачи через стенку.

3) Отток воздуха из кабины задавался расчетным способом, учитывая количество теплопритоков, приходящихся на инфильтрируемый воздух. Рассчитываемый таким образом расход инфильтрируемого воздуха являлся граничным условием для границы «Outlet».

4) Учтен тепловой коэффициент сопротивления слоев ограждений в интерфейсах.

Результаты расчетов значений температуры и скорости представлены на рис. 9–10.

Как видно из результатов расчетов, средняя температура в кабине в подавляющем объеме ее пространства до 70% одинакова (297 К или 24°С), что говорит о слабом влиянии (0,2–0,5°С) более мелкого разбития сетки на конечные результаты расчета в целом. Скорость в точке 7 не превышает нормативные 0,3 м/с.



а)

б)

в)

Рис. 9. Результаты расчетов температуры:
а — в точке 2; б — в точке 3; в — в точке 6

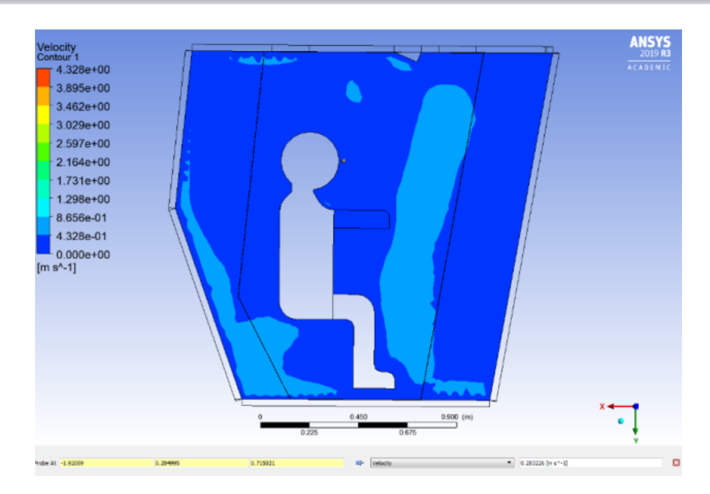


Рис. 10. Результаты расчетов скорости в точке 7

Сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными. Результаты натурного эксперимента, взятые из карты специальной оценки условий труда машиниста ПС (по данным ПАО «ТАГМЕТ»):

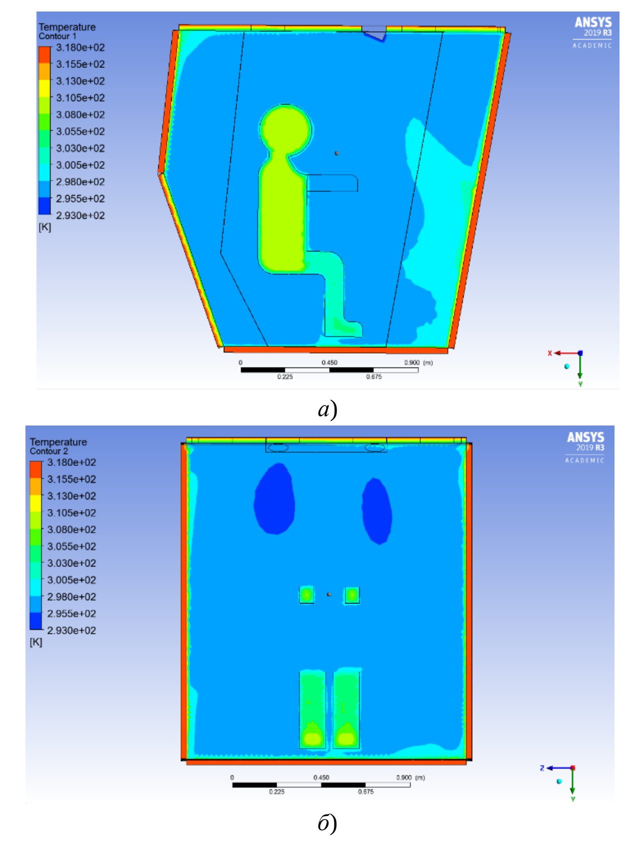
1) Температура окружающего воздуха во время испытаний — 39,4°C.

2) Максимальная разница между средней температурой воздуха в кабине и окружающей среды — 15,7°C.

3) Влажность в кабине — 27% (снаружи 15%).

4) Установившаяся средняя температура в кабине — 24,6°C.

Результаты модельных расчетов представлены на рис. 11.



а)

б)

Рис. 11. Средняя температура в кабине: а — вид сбоку; б — вид спереди

По результатам модельных расчетов можно сделать вывод о том, что расхождение между экспериментальными и модельными значениями составляют не более 0,16°C. Этот факт дает право говорить об адекватности созданной модели с точки зрения достижения необходимой температуры и скорости движения воздуха.

Выводы. Уточнение расчетной сетки и учет инфильтрации в модели, в конечном итоге, позволили получить более корректные результаты: температуры в характерных точках отличаются не более чем на 1,3°С, значения скоростей не превышают нормативные 0,3 м/с, средняя нормируемая температура 24°С поддерживается в объеме, составляющем около 60–70 % всего объема кабины. Что касается обеспечения необходимого давления воздуха в кабине металлургического крана, при данном подходе средства ANSYS FluidFlow (CFX) не предполагают построение картины равномерного распределения давления в замкнутом пространстве при подаче воздуха внутрь. Возможно только отображение давления в потоке подаваемого воздуха. Решение данной проблемы возможно при более тщательной настройке граничных условий модели.

В целом, конечно-элементный анализ позволяет решить довольно важную, с точки зрения производственной безопасности, проблему — предотвращение снижения производительности системы кондиционирования путем рационального подбора оборудования на стадии проектирования и прогнозирования, а также достижения за счет этого параметров микроклимата.

Библиографический список

1. Масленский, В. В. Установление класса условий труда оператора литейного мостового крана за счет моделирования полей теплового облучения и температуры / В. В. Масленский, Ю. И. Булыгин // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сб. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. — Томск : Изд-во ТПУ, 2020. — С. 176–179.

2. Самыкина, Е. В. Влияние нагревающего микроклимата как приоритетного фактора риска развития профессиональной патологии / Е. В. Самыкина, С. В. Самыкин // Вестник медицинского института «Реавиз»: реабилитация, врач и здоровье. — 2017. — № 5. — С. 144–147.

3. Булыгин, Ю. И. Разработка элементов системы нормализации микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна TORUM / Ю. И. Булыгин, Е. В. Щекина, В. В. Масленский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2019. — № 2. — С. 2–12. DOI : https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-2-12

4. Голубкин, В. С. Расчет системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета / В. С. Голубкин, И. Е. Меньщиков // Молодежный научно-технический вестник. — 2013. — № 3. — С. 12.

5. Топорец, В. Предпосылки к выбору идеализированной системы вентиляции и кондиционирования / В. Топорец, Е. Э. Баймачев, В. С. Игнатьев // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2017. — № 4 (23). — С. 204–212. DOI : http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2017-4-204-212

6. Абрамова, И. А. К вопросу о выполнении конечно-элементного анализа в CAE-системах / И. А. Абрамова, Д. Н. Борисов, А. А. Жуков // Наука и военная безопасность. — 2016. — № 3 (6). — С. 59–65.

7. Ёлшин, В. В. Моделирование процесса сопряженного теплообмена с использованием программного комплекса Ansys CFX / В. В. Ёлшин, Ю. В. Жильцов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2011. — № 10 (57). — С. 186–189.

8. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. — AIAA Journal. — Vol. 32, No. 8. — 1994. — P. 1598–1605.

9. Москвичев, А. В. Применимость моделей турбулентности, реализованных в Ansys CFX, для исследования газодинамики в щелевом канале ТНА ЖРД / А. В. Москвичев // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2013. — № 9 (5–1). — С. 82–85.

10. ГОСТ ИСО 14 269–2–2003 Тракторы и самоходные машины для сельскохозяйственных работ и лесоводства. Окружающая среда рабочего места оператора. Часть 2. Метод испытаний и характеристики систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (Переиздание) // Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС) : [сайт]. — URL: http://docs.cntd.ru/document/1200044533 (дата обращения : 18.12.2020).

Сдана в редакцию 22.12.2020
Запланирована в номер 15.01.2021

Об авторах:

Масленский Виктор Валерьевич, аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4618-029X, vicleng@mail.ru

Булыгин Юрий Игоревич, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону,

пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0644-7412, bulyur_rostov@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Масленский — проведение расчетов, подготовка текста, анализ результатов исследования, формирование выводов; Ю. И. Булыгин — формирование основной концепции, целей и задач исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Submitted 22.12.2020
Scheduled in the issue 15.01.2021

Authors:

Maslenskiy, Viktor V., Postgraduate student, Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4618-029X , vicleng@mail.ru

Bulygin, Yuriy I., Professor, Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Dr. Sci. (Eng.), Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0644-7412 , bulyur_rostov@mail.ru

Contribution of the authors:

V. V. Maslensky — calculations, text preparation, analysis of the results of the study, formulation of the conclusions; Yu. I. Bulygin — formulation of the main concept, goals and objectives of the study, finalization of the text, conclusions correction.